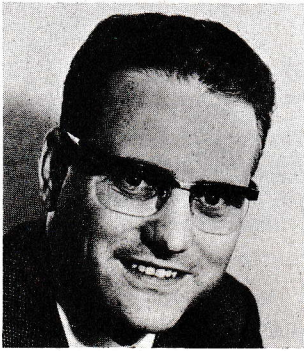


Gerold Siedler

# Feinstruktur der Wasserschichtung im Meer



*Neue elektronische Verfahren bieten die Möglichkeit, die Temperatur- und Salzgehaltsverteilung im Meer mit hoher räumlicher Auflösung zu bestimmen. Es zeigt sich, daß neben der seit langem bekannten großräumigen Schichtung Feinstrukturen mit Größen bis hinab zu wenigen Zentimetern existieren. Die jetzt vorliegenden Ergebnisse lassen erkennen, daß verschiedene physikalische Vorgänge bei der Erzeugung der Feinstruktur beteiligt sind. Die Aufklärung dieser Zusammenhänge führt zum Verständnis von Transport- und Vermischungsvorgängen, die bei Fragen der Wärmebilanz von Ozean und Atmosphäre und bei Problemen der Verunreinigung des Meeres von großer Bedeutung sind.*

## Temperatur- und Salzgehaltsunterschiede im Meer

Die Bestimmung der regionalen Verteilung von Temperatur und Salzgehalt in den Ozeanen bildet seit langem einen wichtigen Teil der physikalischen Meeresforschung. Sie schafft die Grundlage für die Berechnung der Wasser- und Wärmebilanz von Ozean und Atmosphäre, sie liefert aber auch Angaben zum inneren Druckfeld im Meer und erlaubt damit Rückschlüsse auf die mittleren Strömungen. Da sich Temperatur und Salzgehalt zumindest im tieferen Wasser auch als natürliche Markierung ansehen lassen, erhält man gleichzeitig Auskunft über die Vermischung von Wasserarten verschiedener Zusammensetzung.

Daß Unterschiede dieser Größen nicht nur großräumig auftreten, ist jedem Badenden bekannt, der im strandnahen Flachwasser oft wärmeres Wasser vorfindet als im küstenfernen Bereich. Häufig wird im tieferen Wasser sogar eine Temperatur-

abnahme mit dem Abstand von der Oberfläche direkt fühlbar. Die meßtechnische Erfassung solcher Phänomene stößt auf die Schwierigkeit, daß ein sehr dichtes Netz von Meßpunkten, also eine hohe räumliche Auflösung in der Horizontalen und Vertikalen, erforderlich ist. Die Messungen müssen möglichst gleichzeitig ausgeführt werden, weil sich gerade kleinräumige Strukturen der Temperatur- und Salzgehaltsverteilung oft in kurzer Zeit ändern.

Neue elektronische Meßverfahren haben es in den letzten Jahren möglich gemacht, für die Messung auf ausgewählten Positionen eine nahezu beliebig hohe Auflösung der Messung in der Vertikalen zu erreichen. Man stieß dabei auf unerwartet stark ausgeprägte Feinstrukturen, die Aufschluß über den Ablauf von Bewegungs- und Vermischungsvorgängen im Ozean geben.

## Meßverfahren

Um in der Vertikalen eine wesentlich höhere Auflösung der Struktur des Meeres zu erreichen, benötigt man im Gegensatz zum klassischen Verfahren der Messung an wenigen Punkten mit Wasserschöpfern eine Methode, bei der eine kontinuierliche Aufnahme der physikalischen Größen erfolgen kann. Dafür wurden in Deutschland (Bathysonde) und in den USA Meßsysteme entwickelt. Beim Absenken einer Sonde von Bord eines Forschungsschiffes werden die Temperatur,

die elektrische Leitfähigkeit und der Wasserdruck gemessen und mit Hilfe geeigneter Modulationsverfahren über ein eindriges Kabel zum Schiff übertragen (Bild 1). Dort lassen sich die Daten mit Analogschreibern unmittelbar darstellen oder in digitaler Form auf Magnetband oder Lochstreifen speichern. Aus den drei gemessenen Größen lassen sich der Salzgehalt und die Dichte des Meerwassers berechnen. Wichtig sind bei diesen Messungen eine sehr hohe Meßgenauigkeit, eine kleine Anzeigetragheit des Meßfühlers und Unempfindlichkeit gegenüber den rauen Bedingungen des See-Einsatzes.

Die Beobachtung sehr feiner Strukturen mit dieser Meßtechnik wird beschränkt durch den Einfluß der Schiffsbewegungen, die bei Seegang ein gleichmäßiges Absenken der Sonde unmöglich machen. Deshalb wurde am Kieler Institut für Meereskunde ein Meßsystem entwickelt, bei dem mit Hilfe einer auf dem Meeresboden verankerten Unterwasserwinde eine Sonde vom Boden nach oben bewegt wird (Bild 1). Ein Kabel verbindet die Winde mit einer Küstenstation, wo Steuerung, Energieversorgung und Datenaufzeichnung erfolgen.

## Typische Meßergebnisse

Je nach Seegebiet, Jahreszeit und Wetterbedingungen findet man verschiedene Erscheinungsformen der Feinstruktur. Die folgenden Bilder zeigen einige typische Beispiele. Es gibt einige Gebiete, in denen

*Prof. Dr. Gerold Siedler,  
Institut für Meereskunde (Abteilung  
Meeresphysik) an der Universität Kiel.*

*Geb. 1933; physikalische Ausbildung, seit  
1960 als Ozeanograph in Kiel, 1967 bis  
1968 Woods Hole Oceanographic Institution  
und Massachusetts Institute of Technology,  
U.S.A.*

*Dieser Aufsatz wurde dem UMSCHAU-  
Buch „Erforschung des Meeres“, Hrsg.  
G. Dietrich, Umschau Verlag, Frankfurt  
am Main, 1970, entnommen.*



eine meßbare Feinstruktur nicht beobachtet wurde. Dazu gehört das tiefe Wasser des Mittelmeeres und des Roten Meeres. Abb. 2 zeigt Vertikalprofile von Temperatur und Salzgehalt für das westliche Mittelmeer. Nur im oberflächennahen Bereich, vor allem beim Übergang von der warmen, salzärmeren Deckschicht zum tieferen Wasser findet man Anzeichen von Feinstrukturen.

Andere Verhältnisse findet man im nördlichen Nordatlantik. Bild 3 zeigt Vertikalprofile aus der Irminger See zwischen Grönland und Island (1). Hier findet man eine ausgeprägte Feinstruktur in der gesamten Wassersäule. Der Vergleich der Meßprofile vom Absenken (Fieren) und Heben (Hieven) der Sonde zeigt, daß sich die Feinstruktur innerhalb der Meßdauer von etwa einer halben Stunde vollständig verändert.

In flachen Randmeeren wie der Ostsee ist die Feinstruktur besonders ausgeprägt.

Bild 4 zeigt Temperaturprofile, die in der mittleren Ostsee kurz nacheinander in je fünf Seemeilen (ca. 9,3 km) Abstand aufgenommen wurden (2). Es ergibt sich ein verwirrendes, außerordentlich kompliziertes Bild der Temperaturverteilung mit großer räumlicher und auch zeitlicher Veränderlichkeit.

#### Ursachen der Feinstruktur

Das häufige Auftreten der Feinstruktur in der Nähe der Meeresoberfläche legt die Vermutung nahe, daß sie durch Vorgänge an der Oberfläche entsteht. Neuere Untersuchungen zeigen, daß tatsächlich Wechselwirkungsprozesse zwischen Atmosphäre und Ozean eine beherrschende Rolle spielen. Daneben treten aber mindestens zwei weitere Entstehungsmechanismen im Inneren des Ozeans auf. Einmal führen große Unterschiede der Strömungsgeschwindigkeit in der Vertikalen gelegentlich zu „Scherungsinstabilitäten“, die ein Aufbrechen einer gleichförmigen Schichtung in kleine Strukturen bewirken. Zum anderen führen unterschiedliche Geschwindigkeiten in der Ausbreitung von Wärme und Salz bei molekularer Diffusion gelegentlich zur Ausbildung besonderer Formen der Feinstruktur. Diese drei Entstehungsmechanismen sollen im folgenden anhand einiger Meßergebnisse diskutiert werden.

#### Wechselwirkungsvorgänge an der Meeresoberfläche

Zeitliche Änderungen der Lufttemperatur, der Strahlung, der Verdunstung, des Luftdruckes und des Windschubes an der Mee-

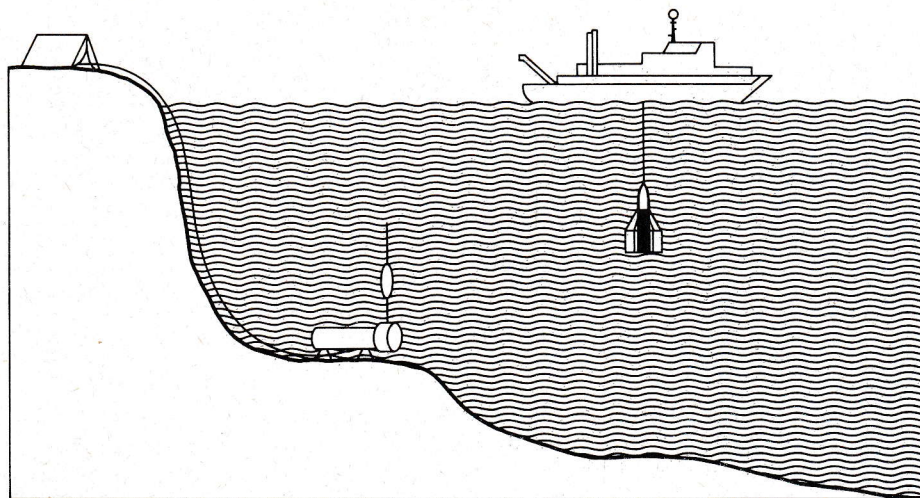


Abb. 1. Bathysonde und Unterwasserwinden-Meßsystem.

Abb. 2: Temperatur- und Salzgehaltsverteilung im westlichen Mittelmeer im November. Die ausgezogenen Linien zeigen die Meßergebnisse vom Fieren, die punktierten Linien die Ergebnisse vom anschließenden Hieven der Sonde.

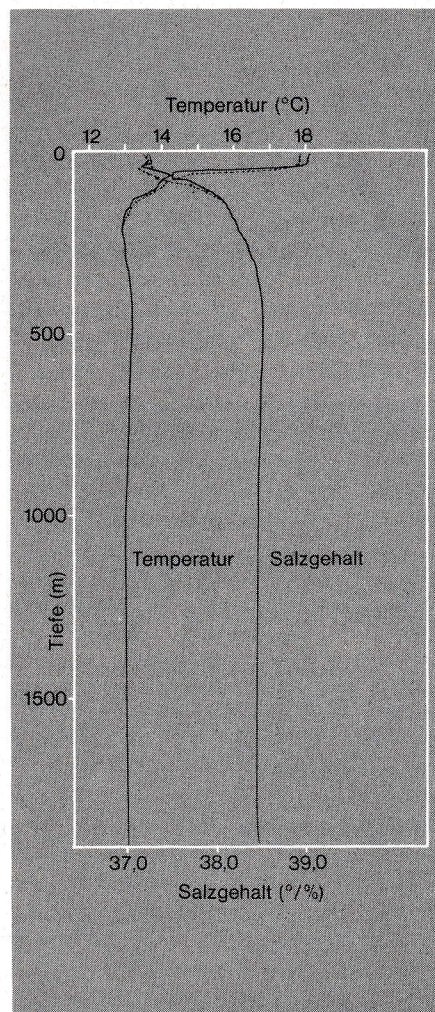
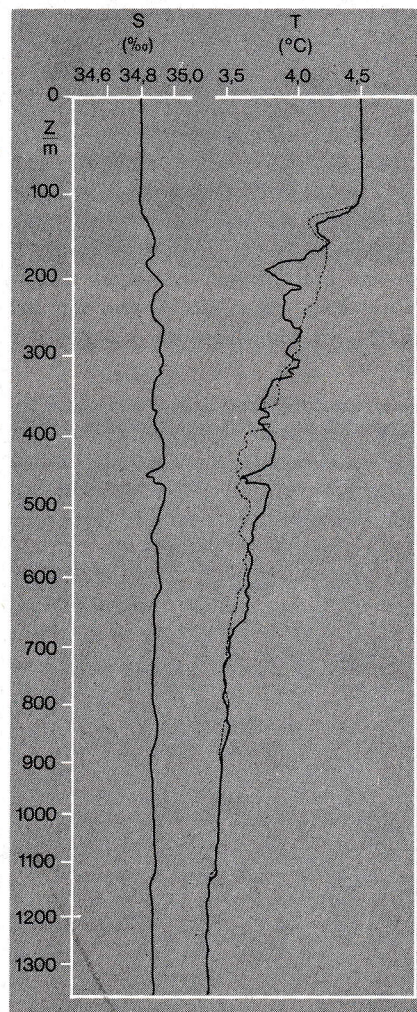
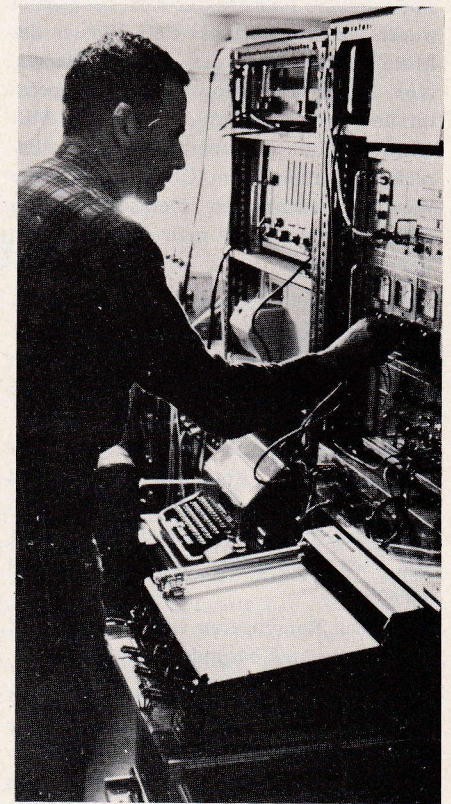
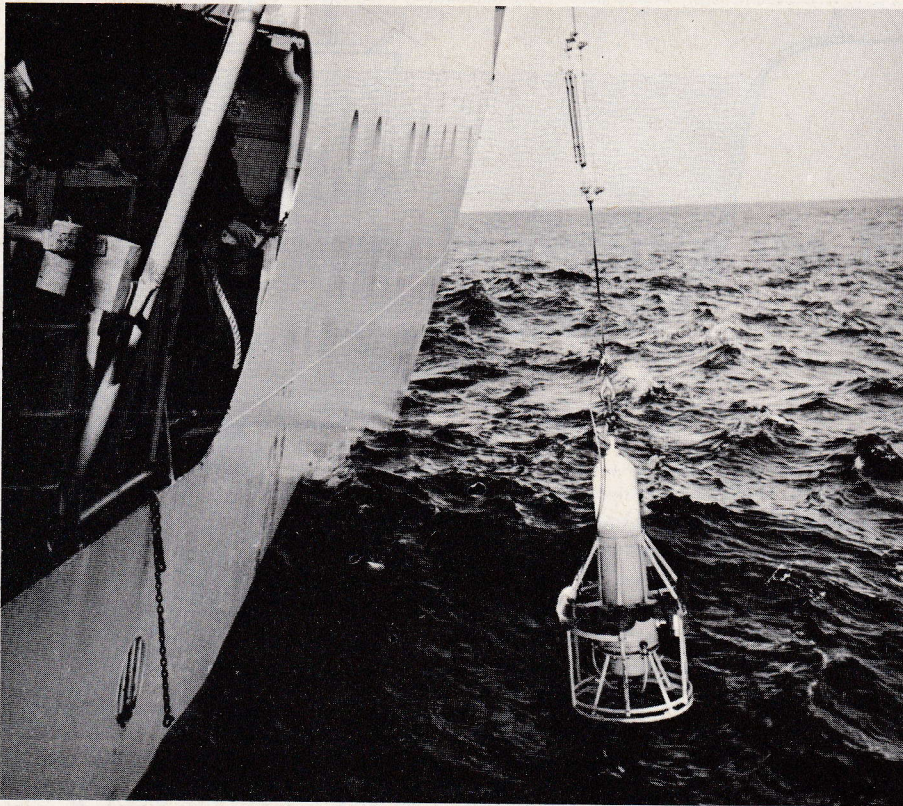


Abb. 3: Temperatur- und Salzgehaltsverteilung in der Irminger See (Nordatlantik) im Mai. Die ausgezogenen Linien zeigen die Meßergebnisse vom Fieren, die punktierten Linien die Ergebnisse vom anschließenden Hieven der Sonde.







Links: Einsatz der Bathysonde zur Messung von Temperatur und Salzgehalt an Bord des Forschungsschiffes „Meteor“.

Rechts: Meßwerterfassung im Bordlabor bei Feinstrukturuntersuchungen.

resoberfläche bewirken räumliche Änderungen der Temperatur- und Salzgehaltsstruktur des Seewassers. Den Zusammenhang zwischen Änderungen in der Atmosphäre und dem Entstehungszeitpunkt und dem Charakter der Temperatur-Feinstruktur im Meer zeigen besonders deutlich Messungen, die in der Ostsee mit dem Unterwasserwinden-System erhalten wurden (3).

Bei geringen Windstärken und damit bei niedrigem Seegang ist die turbulente Bewegung schwach entwickelt, und die Erwärmung von der Atmosphäre ist auf eine dünne Deckschicht beschränkt. Bild 5 ent-

hält eine Folge von Temperatur-Vertikalprofilen, die die Entstehung einer nur etwa 1 m dicken warmen Deckschicht zeigt. Bei der abendlichen Abkühlung wird das Wasser an der Oberfläche kälter und damit schwerer und sinkt ab, es tritt „Vertikalkonvektion“ auf. Die Struktur in Oberflächennähe wird abgebaut, geringfügige Inhomogenitäten werden im tieferen Wasser erzeugt.

Häufiger beobachtet man allerdings unregelmäßige Strukturen wie in Bild 6. Hier wird offenbar die an der Oberfläche zugeführte Wärme in bestimmten Zeitabschnitten auf verschieden dicke Ober-

flächenschichten übertragen. Die entstandenen Strukturen wandern als Folge turbulenter Vermischung bei fortlaufender Veränderung nach unten. Die in Bild 6 sichtbaren, nach oben wandernden Strukturen in den unteren Metern zeigen dagegen den Effekt des horizontalen Transports von salzreichem, kälterem Bodenwasser.

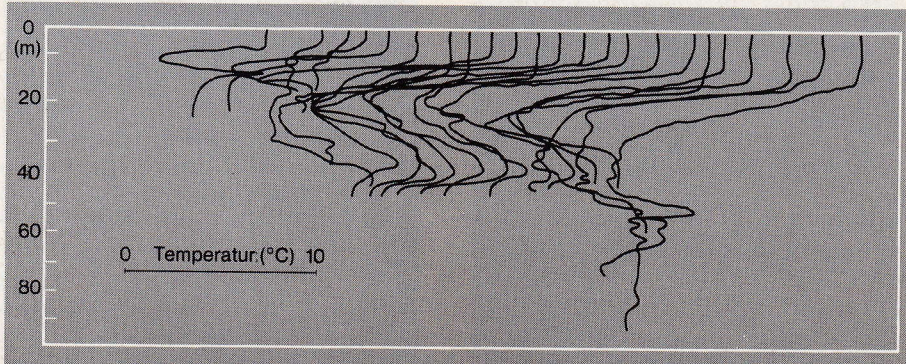
Besonders interessant ist das Auftreten von nur 10 bis 30 cm dicken warmen oder kalten Schichten unmittelbar an der Oberfläche, die nur über kurze Zeiten bis zu einigen Stunden existieren und offenbar mit lokalen Ereignissen an der Grenzfläche zusammenhängen (z. B. Hagel, der eine kalte, salzarme Schicht erzeugt).

Solche an der Oberfläche entstandenen Temperatur- und Salzgehaltsänderungen bewirken also in unmittelbarer Nähe, aber infolge von turbulenten Vermischungsvorgängen auch in größerer Tiefe das Auftreten einer Feinstruktur.

#### Scherungsinstabilität im Inneren des Ozeans

Im Gegensatz zur bis vor kurzem vorherrschenden Meinung findet man im tiefen Ozean weite Gebiete, in denen laminare Bewegung herrscht, also keine Ver-

Abb. 4: Temperaturvertikalprofile in der mittleren Ostsee im August. Die Profile sind entsprechend dem Stationsabstand von je etwa 5 Seemeilen gegeneinander verschoben.





wirbelung (Turbulenz) vorliegt (4). Messungen britischer Forscher, die im Mittelmeer Wasser anfärbten und die Ausbreitung des so gekennzeichneten Wassers mit Tauchern beobachteten, zeigen, daß gelegentlich in diesen Gebieten ein plötzlicher Übergang zu turbulenter Bewegung erfolgt (5). Diese Erscheinung findet man an etwa 10 cm dicken Schichten mit großen vertikalen Temperaturdifferenzen, die von internen Wellen auf- und abbewegt werden. Zu diesen internen Wellen gehören horizontale Bewegungen, die am Wellenberg und im Wellental zu großen Strömungsdifferenzen führen. Dort bricht die Schichtung bei ausreichender Scherung auf, und es bilden sich Flecken mit einer Ausdehnung von etwa 1 m, in denen durch Verwirbelung Feinstruktur entsteht (Bild 7).

Aber nicht nur interne Wellen führen zu einer Scherungsinstabilität im oberflächennahen Bereich. Dichtenausgleichsströmungen als Folge hoher Verdunstung in Nebenmeeren können in Meeresstraßen (Gibraltar, Bab el Mandeb) große Stromscherungen in mittleren Tiefen erzeugen (6). Auch hier findet eine turbulente Vermischung von Wasserarten mit unterschiedlichen Temperatur- und Salzgehaltswerten statt, es entsteht Feinstruktur. Man findet sie noch in großer Entfernung von der Meeresstraße in weit größeren Tiefen, wohin sie durch Transportvorgänge mit horizontaler und mit Absinkbewegung gelangt. Bild 8 zeigt einige Temperaturprofile aus einem Gebiet etwa 400 km westlich von Gibraltar (7, 8). In einem Tiefenbereich von etwa 700 bis 1300 m treten bei den durch Beifügung von Mittelmeerwasser bewirkten höheren Temperaturen ausgeprägte Strukturen auf, deren Entstehung in erster Linie durch Scherungsinstabilität in der Straße von Gibraltar bewirkt wird.

#### Unterschiedliche molekulare Diffusion von Wärme und Salz

Betrachtet man die mittleren Profile in Bild 8 genauer, so fällt auf, daß an der Untergrenze des Bereichs mit Mittelmeerwasser treppenartige Strukturen auftreten (9). Experimente in Labortankanlagen (10) haben verstehen lassen, wie es zu solchen Schichten kommt.

Die Dichte des Meerwassers steigt mit wachsendem Salzgehalt und nimmt mit wachsender Temperatur ab. Es ist deshalb stets möglich, zu einer Wasserart mit bestimmten Salzgehalts- und Temperaturwerten eine zweite Wasserart mit höherem Salzgehalt herzustellen, die bei höherer Temperatur die gleiche oder eine nur wenig kleinere Dichte besitzt. Schichtet man

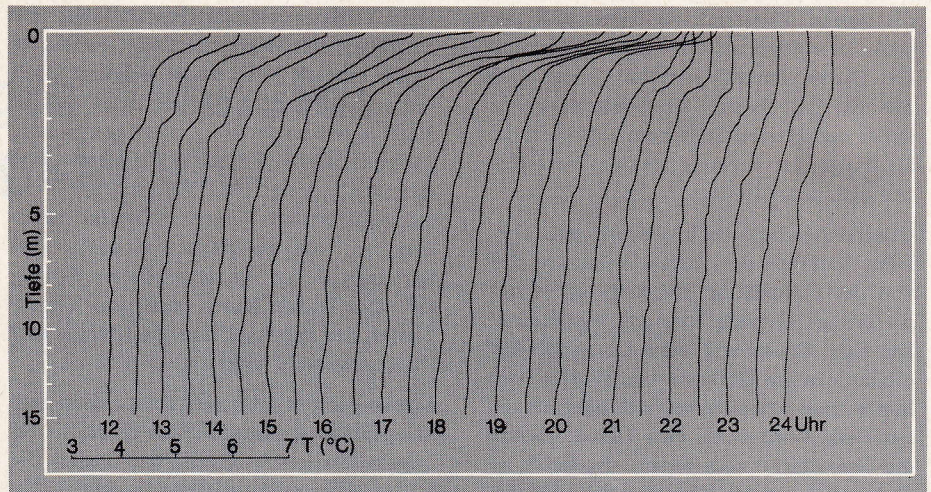


Abb. 5. Zeitliche Folge von Temperatur-Vertikalprofilen bei starker Erwärmung von der Atmosphäre und wenig Seegang.

Abb. 6: Zeitliche Folge von Temperatur-Vertikalprofilen bei zeitlich veränderlicher Vermischung.

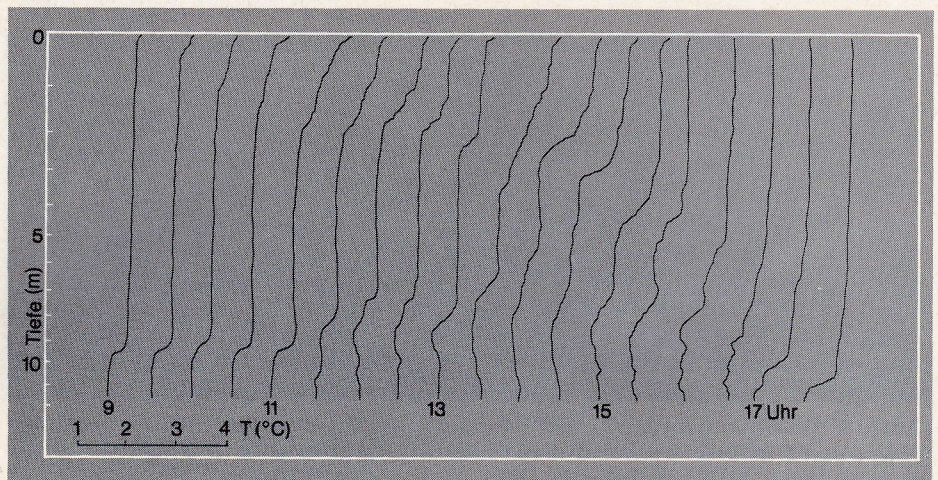
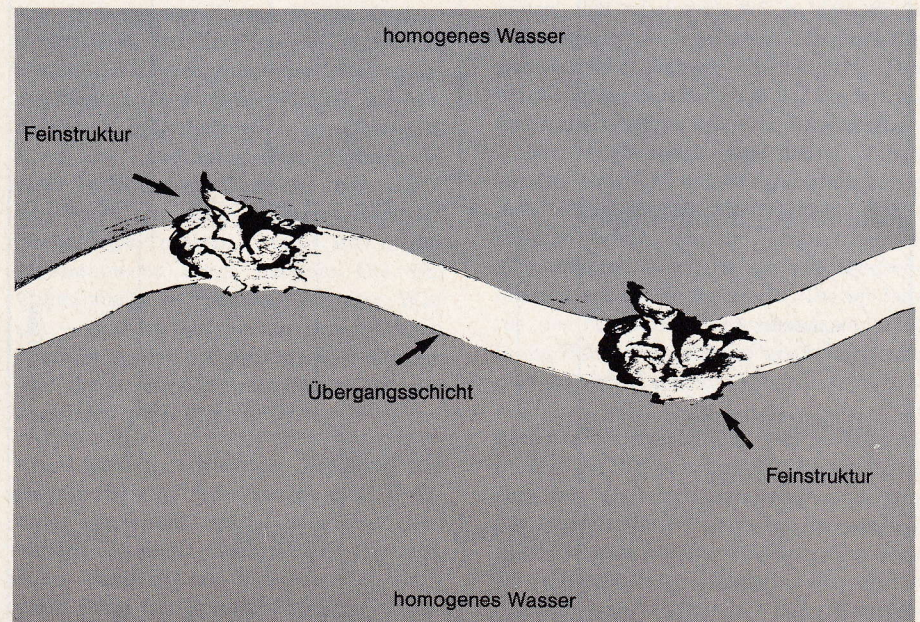


Abb. 7: Schematische Darstellung der Entstehung von Feinstruktur-Flecken durch Scherungsinstabilität bei internen Wellen.





die zweite Wasserart im Tank über die erste, so sollten an der Grenzfläche, weil die Dichte überall konstant oder oben kleiner ist, keine Vertikalbewegungen außer den kleinen Störungen auftreten, die als Folge der niemals idealen Versuchsbedingungen auftreten.

Überraschenderweise beobachtet man aber beim Anfärben der oberen Wasserart, daß von der Grenzfläche aus nach unten fingerförmige Gebilde wachsen. Sie verdanken ihre Entstehung dem Umstand, daß die molekulare Diffusion von Wärme etwa hundertmal schneller vor sich geht als die von Salz. Wird durch eine kleine Störung die Grenzfläche nach unten ausgebeult, so vermindert sich die Temperatur in dieser Ausbuchtung durch Diffusion stark, der Salzgehalt jedoch nur wenig. Die Dichte wird damit größer, und das jetzt schwerere Wasser fällt nach unten. Es bildet sich ein „Salzfinger“.

Die Tankexperimente zeigen, daß die Salzfinger eine begrenzte Länge haben, an ihrem unteren Ende bildet sich eine stark verwirbelte Schicht. Unter dieser Schicht kann es wieder zu einer Salzfingerbildung kommen. Dabei bilden sich Treppen, wie das Bild 9 zeigt. An den Sprüngen der Salzgehalts- und Temperaturprofile befinden sich die Salzfinger, zwischen den Sprüngen liegen die verwirbelten Schichten. Die Dichte ändert sich im Tiefenbereich der Salzfinger nur geringfügig und ist sonst jeweils konstant.

Messungen der mittleren Temperatur- und Salzgehaltsverteilung für die in Bild 8 gezeigten Stationen zeigen, daß genau die erforderlichen Ausgangsbedingungen für den geschilderten Vorgang vorliegen. Höchstwahrscheinlich verdanken daher die beobachteten Treppenstrukturen ihre Entstehung dem geschilderten Prozeß mit einer Bildung von Salzfingern.

## Entwicklungstendenzen und Anwendungen

Die Diskussion der Messungen versucht zu zeigen, daß man die wichtigsten Entstehungsursachen der Feinstruktur im Ozean kennt. Die Ergebnisse sind jedoch zu einem großen Teil bisher qualitativer Natur. Eine quantitative Erfassung der bei der Feinstrukturzeugung ablaufenden Vorgänge erfordert den gleichzeitigen Einsatz verschiedenartiger Meßverfahren mit verbesserter räumlicher und zeitlicher Auflösung. Gezielte Untersuchungen in Seegebieten mit besonders typischen Verhältnissen sind erforderlich.

Besonders interessant ist die Frage nach der praktischen Anwendung von Erkenntnissen, die bei solchen Feinstrukturuntersuchungen gewonnen werden. Aus der vorangegangenen Diskussion ergab sich, daß die Untersuchungen zu einem verbesserten Verständnis der Vermischung und des Transports von Meerwasser führen. Da die Ozeane und die Atmosphäre ein zusammengehöriges System bilden, führt eine Verbesserung in der Erfassung der Austauschvorgänge an der Meeresoberfläche zu einer erhöhten Genauigkeit bei der Bestimmung des Wasser- und Wärmehaushalts der Erde, die für meteorologische Fragestellungen notwendig ist.

Die wichtigste Anwendung der geschilderten Ergebnisse liegt jedoch bei Problemen der Verschmutzung des Ozeans und deren Rückwirkung auf die feste Erde. Ein Verständnis der Feinstruktur führt zur Erfassung wichtiger Prozesse bei der Vermischung und dem Transport von Schadstoffen im Meer. Aussagen über die Geschwindigkeit der Ausbreitung von Verschmutzungen und über die zu erwartenden Konzentrationen werden damit ebenso möglich wie Angaben, welche Meßverfahren bei solchen praktischen Fragestellungen angewandt werden sollten.

Die hier beschriebenen Untersuchungen wurden teilweise von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert.

Literatur: (1) Holzkamm, F., G. Krause und G. Siedler: Deep-Sea Research 11 (1964) S. 881—890. — (2) Siedler, G.: Kieler Meeresforschungen 17 (1961): S. 148—153. — (3) Münzer, W.: Dissertation (1969) Universität Kiel (unveröffentlicht). — (4) Grant, H. L., A. Moillet und W. M. Vogel: J. Fluid Mechanics 34 (1968) S. 443—448. — (5) Woods, J. D.: J. Fluid Mechanics 32 (1968) S. 791 bis 800. — (6) Siedler, G.: Kieler Meeresforschungen 24 S. 59—65. — (7) Zenk, W.: Meteor-Forschungsergebnisse, Reihe A (1969) Berlin (in Vorbereitung). — (8) Zenk, W.: UMSCHAU 69 (1969) S. 655. — (9) Tait, R. J., und M. R. Howe: Deep-Sea Research 15 (1968) S. 275—280. — (10) Stern, M. E., und J. S. Turner: Deep-Sea Research 16 (1969) S. 497—511.

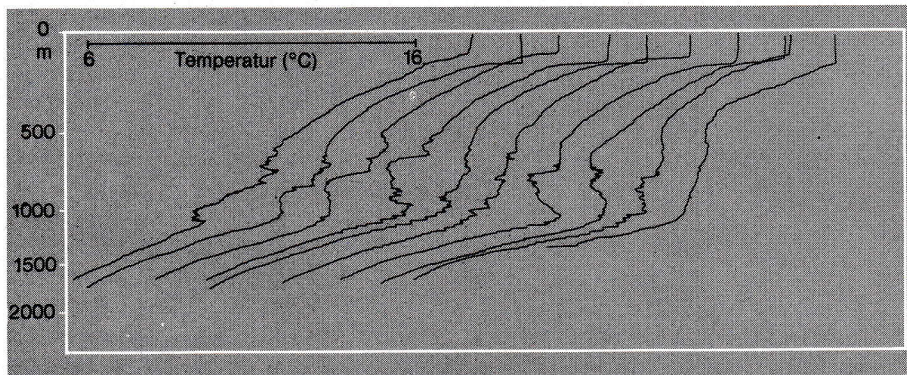


Abb. 8: Temperaturprofile etwa 400 km westlich von Gibraltar. Die Profile sind entsprechend dem Stationsabstand von je etwa 20 Seemeilen gegeneinander verschoben.

Abb. 9: Schematische Darstellung der Entstehung von Treppenstrukturen durch Salzfingerbildung.

